

## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

## Applications

## Généralités

Spectres  
Trains d'ondes

## Interférences

Superposition de 2  
ondes  
Conditions  
d'interférences  
Ordre d'interférences  
Contraste

## Cohérence

Cohérence spatiale  
Cohérence temporelle  
Brouillage  
Longueur de  
cohérence  
Conclusion

## Dispositif d'Young

# Interférences

JR Seigne MP\*, Clemenceau  
Nantes

September 29, 2024

## 1 Applications

## 2 Généralités

Spectres

Trains d'ondes

## 3 Interférences

Superposition de 2 ondes

Conditions d'interférences

Ordre d'interférences

Contraste

## 4 Cohérence

Cohérence spatiale

Cohérence temporelle

Brouillage

Longueur de cohérence

Conclusion

## 5 Dispositif d'Young

## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

## Applications

## Généralités

Spectres  
Trains d'ondes

## Interférences

Superposition de 2  
ondes  
Conditions  
d'interférences  
Ordre d'interférences  
Contraste

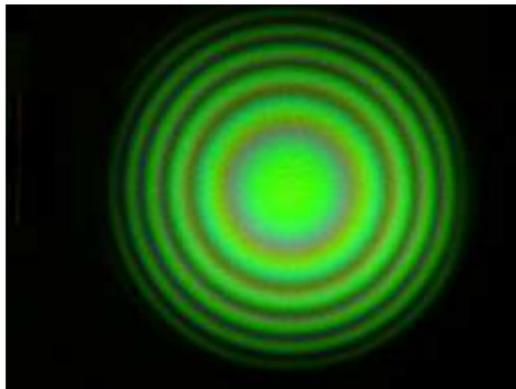
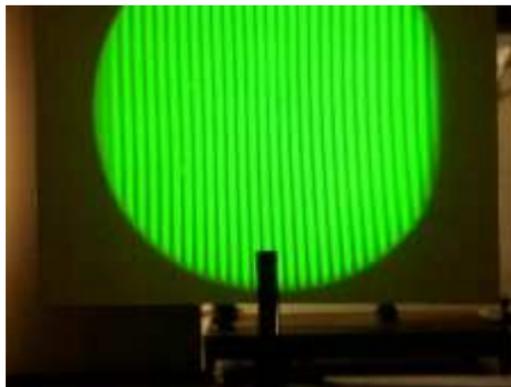
## Cohérence

Cohérence spatiale  
Cohérence temporelle  
Brouillage  
Longueur de  
cohérence  
Conclusion

## Dispositif d'Young

# Des interférences

Elles sont constituées par des alternances de zones d'intensité faible ou nulle et de zones d'intensité élevée.



On voit des franges brillantes et des franges sombres.

## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

## Applications

### Généralités

Spectres  
Trains d'ondes

### Interférences

Superposition de 2  
ondes  
Conditions  
d'interférences  
Ordre d'interférences  
Contraste

### Cohérence

Cohérence spatiale  
Cohérence temporelle  
Brouillage  
Longueur de  
cohérence  
Conclusion

### Dispositif d'Young

- Spectroscopie : mesure de longueur d'onde (spectrométrie interférentielle), de spectres (spectroscopie à réseau)...
- Mesure de distances, d'épaisseurs, de vitesses (vélocimétrie laser), d'angles, de l'accélération de la pesanteur (gravimétrie absolue), de temps, d'indice optique...
- Contrôle ou recherche de défauts (par exemple pour la recherche du défaut de sphéricité d'un miroir sphérique...).
- Stockage d'informations (holographie en volume notamment).
- Techniques de microscopie avancées (contraste de phase, strioscopie...).
- Lithographie interférentielle.
- Synthèse d'ouverture.
- Détection des ondes gravitationnelles avec VIRGO.

## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

# Interféromètre VIRGO

## Applications

## Généralités

Spectres  
Trains d'ondes

## Interférences

Superposition de 2  
ondes  
Conditions  
d'interférences  
Ordre d'interférences  
Contraste

## Cohérence

Cohérence spatiale  
Cohérence temporelle  
Brouillage  
Longueur de  
cohérence  
Conclusion

## Dispositif d'Young



## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

# Lithographie interférentielle

## Applications

## Généralités

Spectres  
Trains d'ondes

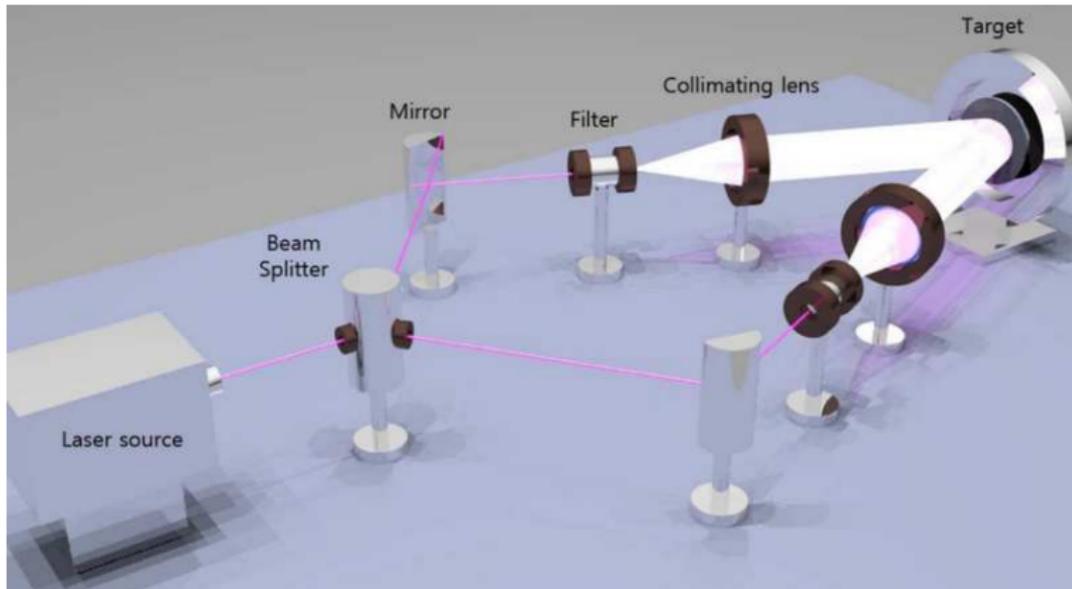
## Interférences

Superposition de 2  
ondes  
Conditions  
d'interférences  
Ordre d'interférences  
Contraste

## Cohérence

Cohérence spatiale  
Cohérence temporelle  
Brouillage  
Longueur de  
cohérence  
Conclusion

## Dispositif d'Young



## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

## Applications

## Généralités

### Spectres

Trains d'ondes

## Interférences

Superposition de 2  
ondes

Conditions  
d'interférences

Ordre d'interférences

Contraste

## Cohérence

Cohérence spatiale

Cohérence temporelle

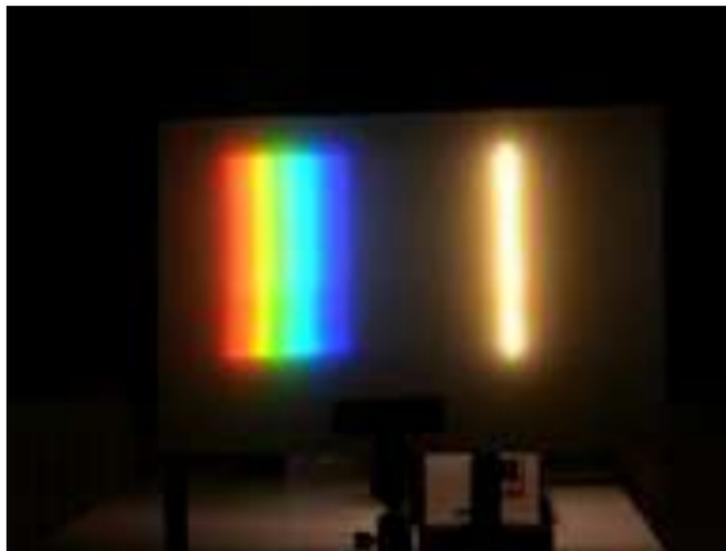
Brouillage

Longueur de  
cohérence

Conclusion

## Dispositif d'Young

# Lumière blanche



Le spectre est continu. Pour la partie visible du spectre :  
 $\lambda \in [400 \text{ nm} ; 750 \text{ nm}]$ .

## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

## Applications

## Généralités

### Spectres

Trains d'ondes

## Interférences

Superposition de 2  
ondes

Conditions  
d'interférences

Ordre d'interférences

Contraste

## Cohérence

Cohérence spatiale

Cohérence temporelle

Brouillage

Longueur de  
cohérence

Conclusion

## Dispositif d'Young

# Lampe spectrale



Le spectre est discontinu formé de raies fines. Les lampes les plus classiques sont celle à mercure Hg observée ici et celle à sodium Na. La raie la plus intense pour le mercure est verte de longueur d'onde  $\lambda = 541,6 \text{ nm}$  de largeur  $\Delta\lambda \leq 1 \text{ nm}$ .



Le spectre est formé d'une seule raie très fine, on parle de source monochromatique. La laser de couleur rouge utilisé en TP est un *hélium - néon* de longueur d'onde  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$  et de largeur  $\Delta\lambda \simeq 10^{-3} \text{ nm}$ .

## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

## Applications

## Généralités

Spectres

Trains d'ondes

## Interférences

Superposition de 2  
ondes

Conditions  
d'interférences

Ordre d'interférences

Contraste

## Cohérence

Cohérence spatiale

Cohérence temporelle

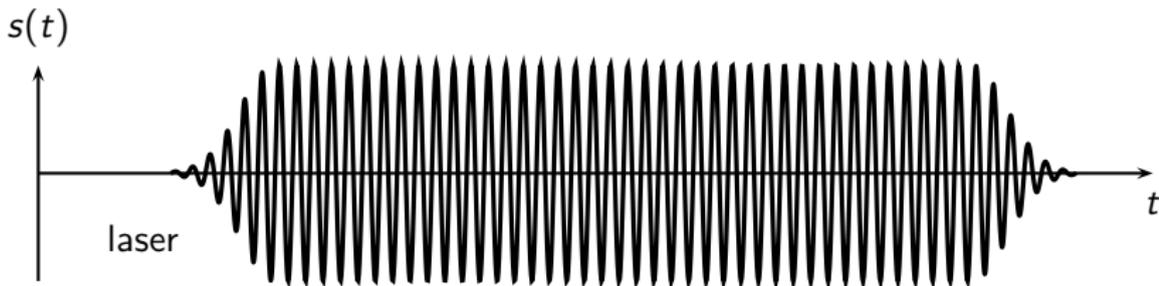
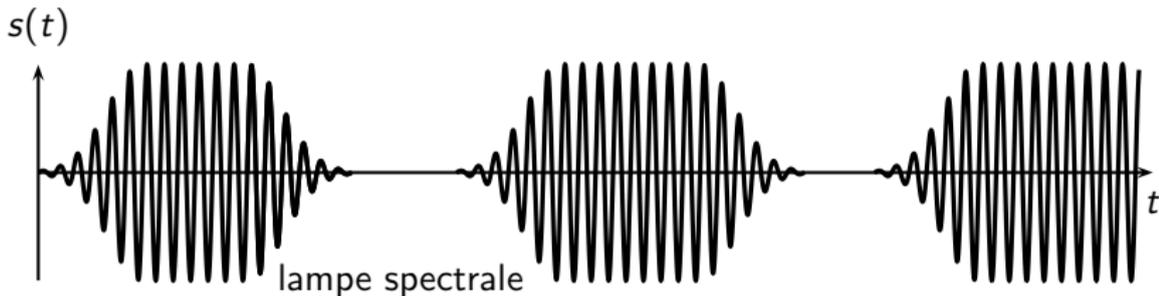
Brouillage

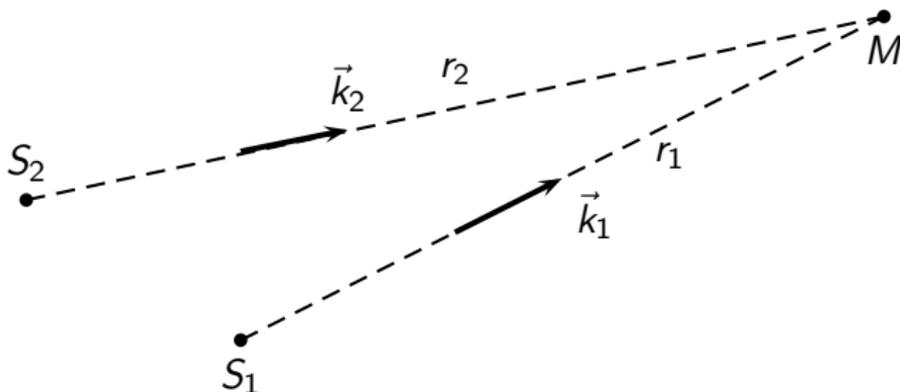
Longueur de  
cohérence

Conclusion

## Dispositif d'Young

# Exemples de trains d'ondes





Les deux atomes sources  $S_1$  et  $S_2$  sont caractérisés par  $\omega_1$  et  $\omega_2$ , ou encore par  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  donc par les vecteurs d'ondes  $\vec{k}_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1} \vec{u}_1$  et  $\vec{k}_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2} \vec{u}_2$  où  $\vec{u}_1$  et  $\vec{u}_2$  sont les vecteurs unitaires des directions  $S_1M$  et  $S_2M$ .

## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

## Applications

## Généralités

Spectres  
Trains d'ondes

## Interférences

Superposition de 2  
ondes

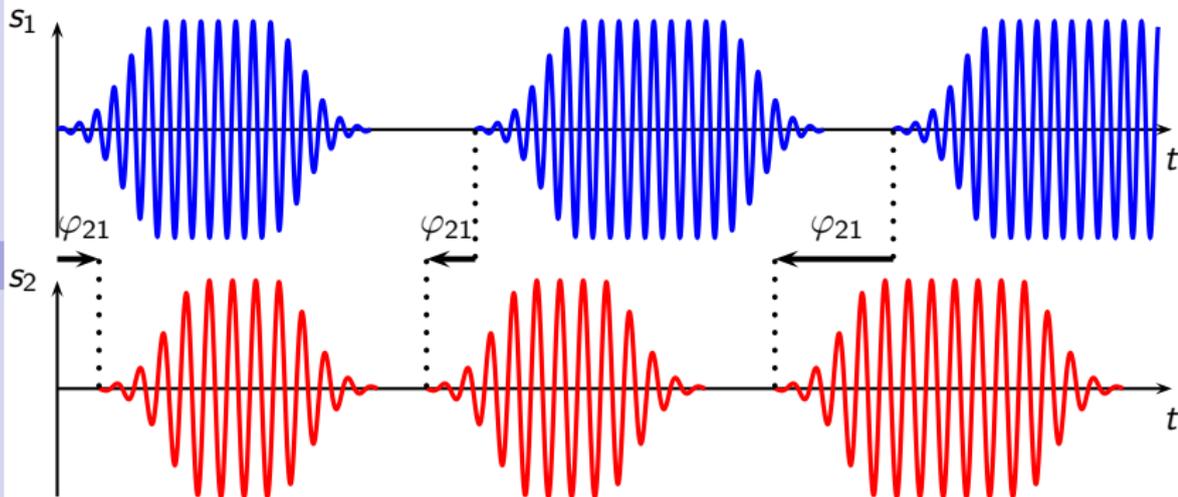
Conditions  
d'interférences  
Ordre d'interférences  
Contraste

## Cohérence

Cohérence spatiale  
Cohérence temporelle  
Brouillage  
Longueur de  
cohérence  
Conclusion

## Dispositif d'Young

# Déphasage aléatoire



$$\langle \varphi_{12}(t) \rangle = 0 \quad \text{et en particulier} \quad \langle \cos(A + \varphi_{12}(t)) \rangle = 0$$

La superposition des ondes au point  $M$  donne :

$$s(M, t) = s_{01} \exp i(\omega_1 t - \vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1) + s_{02} \exp i(\omega_2 t + \varphi_{21}(t) - \vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2)$$

Or l'éclairement est donné par :

$$E(M, t) = \beta s(M, t) s^*(M, t)$$

On obtient après calcul :

$$E(M, t) = E_1 + E_2 + 2\sqrt{E_1 E_2} \cos[(\omega_2 - \omega_1)t + \vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 - \vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 + \varphi_{21}(t)]$$

L'éclairement enregistré par un récepteur est une moyenne :

$$E_{\text{perçu}}(M) = E_1 + E_2 + 2\sqrt{E_1 E_2} \langle \cos \phi(t) \rangle$$

avec  $\phi(t) = (\omega_2 - \omega_1)t + \vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 - \vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 + \varphi_{21}(t)$ .

## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

$$E_{\text{perçu}}(M) \neq E_1 + E_2 \text{ si } \langle \cos \phi(t) \rangle \neq 0.$$

Ceci n'est possible que si :

$$\phi(t) = (\omega_2 - \omega_1)t + \vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 - \vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 + \varphi_{21}(t)$$

est indépendant du temps.

$$\omega_1 = \omega_2 : \text{sources synchrones}$$

$$\varphi_{12} = \text{Constante} : \text{sources cohérentes}$$

Ceci n'est possible que si l'on utilise :

**une seule source**

## Applications

## Généralités

Spectres  
Trains d'ondes

## Interférences

Superposition de 2  
ondes

Conditions  
d'interférences

Ordre d'interférences

Contraste

## Cohérence

Cohérence spatiale  
Cohérence temporelle

Brouillage

Longueur de  
cohérence

Conclusion

## Dispositif d'Young

## Formules

$$E_{\text{perçu}}(M) = E_1 + E_2 + 2\sqrt{E_1 E_2} \cos 2\pi \frac{\delta}{\lambda}$$

Cette formule est la formule fondamentale des interférences à deux ondes avec deux ondes contribuant de façon différente à l'éclairement. La plupart du temps, on étudie des situations où  $E_1 = E_2 = E_0$  et on se réfère alors à :

$$E_{\text{perçu}}(M) = 2E_0 \left( 1 + \cos 2\pi \frac{\delta}{\lambda} \right)$$

## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

L'éclairement est donné par :

$$E_{\text{perçu}}(M) = E_1 + E_2 + 2\sqrt{E_1 E_2} \cos 2\pi \frac{\delta}{\lambda}$$

On appelle ordre d'interférences le nombre  $p$  sans dimension tel que :

$$\delta = p\lambda$$

## Applications

### Généralités

Spectres  
Trains d'ondes

## Interférences

Superposition de 2  
ondes  
Conditions  
d'interférences  
Ordre d'interférences

Contraste

## Cohérence

Cohérence spatiale  
Cohérence temporelle  
Brouillage  
Longueur de  
cohérence  
Conclusion

Dispositif  
d'Young

	Ordre $p$	éclairement
Franges Brillantes	$p \in \mathbb{Z}$ entier relatif	Maximum
Franges Sombres	$p = (n + \frac{1}{2})$ avec $n \in \mathbb{Z}$	Minimum
Intermédiaire	$p \in \mathbb{R}$ réel quelconque	$E_{\min} < E < E_{\max}$

## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

### Applications

### Généralités

Spectres  
Trains d'ondes

### Interférences

Superposition de 2  
ondes  
Conditions  
d'interférences

#### Ordre d'interférences

Contraste

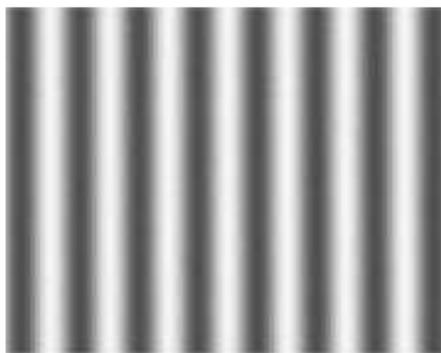
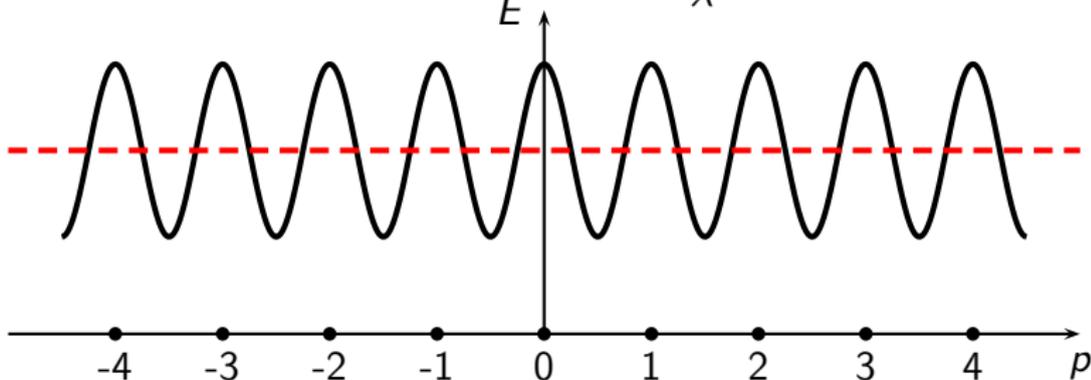
### Cohérence

Cohérence spatiale  
Cohérence temporelle  
Brouillage  
Longueur de  
cohérence  
Conclusion

### Dispositif d'Young

Éclairement donné par :

$$E_{\text{perçu}}(M) = E_1 + E_2 + 2\sqrt{E_1 E_2} \cos 2\pi \frac{\delta}{\lambda}$$



## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

## Applications

## Généralités

Spectres  
Trains d'ondes

## Interférences

Superposition de 2  
ondes  
Conditions  
d'interférences  
Ordre d'interférences

Contraste

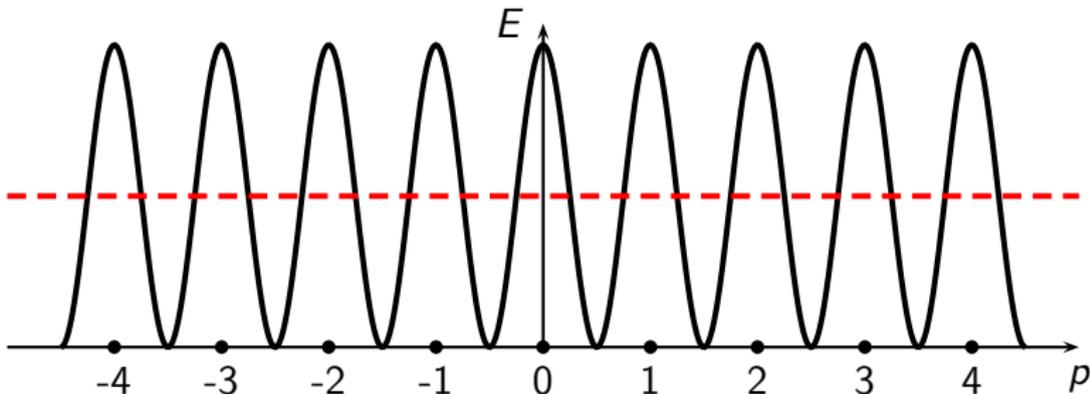
## Cohérence

Cohérence spatiale  
Cohérence temporelle  
Brouillage  
Longueur de  
cohérence  
Conclusion

## Dispositif d'Young

Pour un éclairage donné par :

$$E(M) = 2E_0 \left(1 + \cos 2\pi \frac{\delta}{\lambda}\right)$$



Le contraste est défini par :

$$C = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}}$$

$$E_{\text{perçu}}(M) = E_1 + E_2 + 2\sqrt{E_1 E_2} \cos 2\pi \frac{\delta}{\lambda}$$

On a :

$$C = \frac{2\sqrt{E_1 E_2}}{E_1 + E_2}$$

Le contraste est toujours compris entre 0 et 1 :  $0 \leq C \leq 1$

Cas particulier pour  $E(M) = 2E_0(1 + \cos 2\pi \frac{\delta}{\lambda})$  :

$$C = 1$$

C'est la meilleure situation pour observer les franges brillantes et les franges sombres.

## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

## Applications

## Généralités

Spectres  
Trains d'ondes

## Interférences

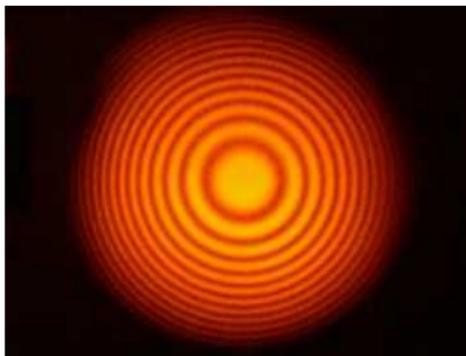
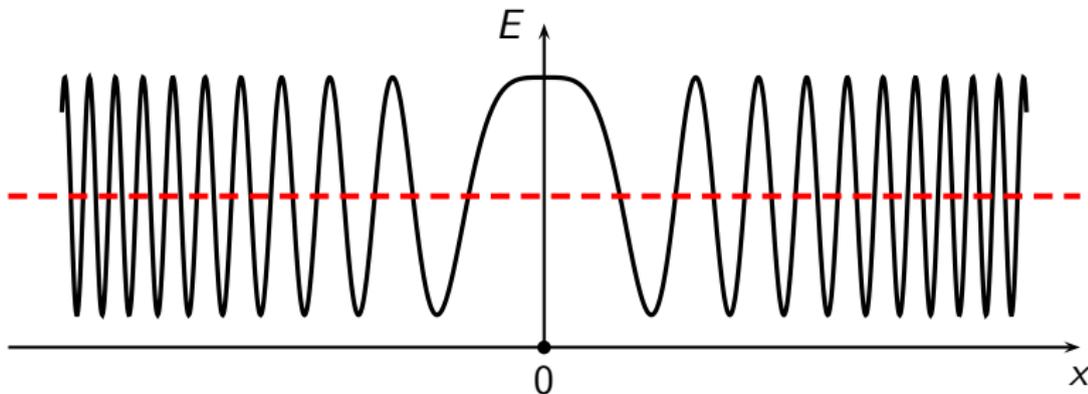
Superposition de 2  
ondes  
Conditions  
d'interférences  
Ordre d'interférences  
Contraste

## Cohérence

Cohérence spatiale  
Cohérence temporelle  
Brouillage  
Longueur de  
cohérence  
Conclusion

## Dispositif d'Young

# Contraste élevé



Contraste  $C \simeq 0,8$

## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

## Applications

## Généralités

Spectres  
Trains d'ondes

## Interférences

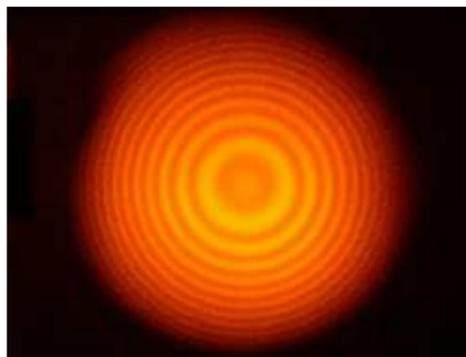
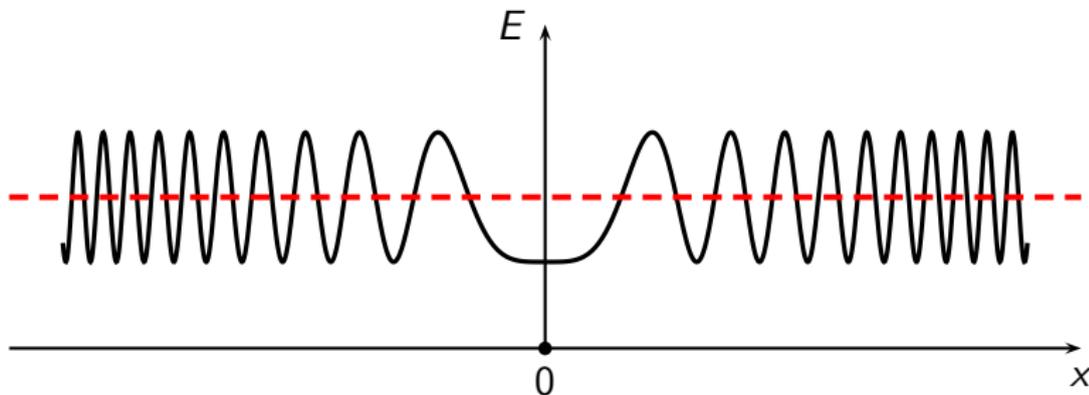
Superposition de 2  
ondes  
Conditions  
d'interférences  
Ordre d'interférences  
Contraste

## Cohérence

Cohérence spatiale  
Cohérence temporelle  
Brouillage  
Longueur de  
cohérence  
Conclusion

## Dispositif d'Young

# Contraste moyen



Contraste  $C \simeq 0,4$

## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

## Applications

## Généralités

Spectres  
Trains d'ondes

## Interférences

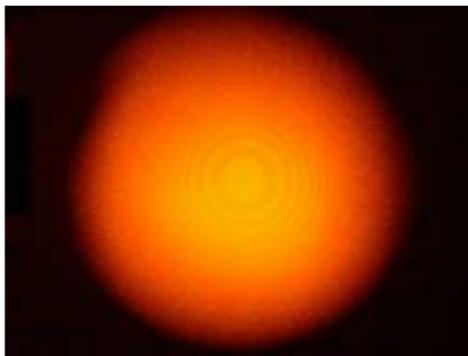
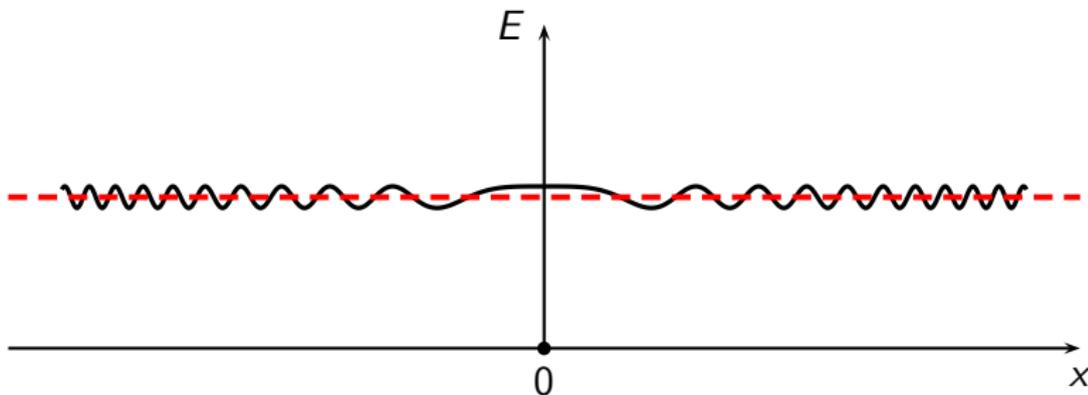
Superposition de 2  
ondes  
Conditions  
d'interférences  
Ordre d'interférences  
Contraste

## Cohérence

Cohérence spatiale  
Cohérence temporelle  
Brouillage  
Longueur de  
cohérence  
Conclusion

## Dispositif d'Young

# Contraste faible



Contraste  $C < 0,1$

## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

## Applications

## Généralités

Spectres  
Trains d'ondes

## Interférences

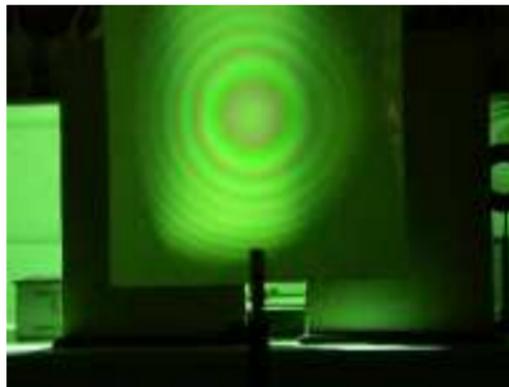
Superposition de 2  
ondes  
Conditions  
d'interférences  
Ordre d'interférences  
Contraste

## Cohérence

Cohérence spatiale  
Cohérence temporelle  
Brouillage  
Longueur de  
cohérence  
Conclusion

## Dispositif d'Young

# Source ponctuelle



Le diaphragme est très fermé. Le contraste est relativement élevé avec une source spatialement peu étendue.

## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

## Applications

## Généralités

Spectres  
Trains d'ondes

## Interférences

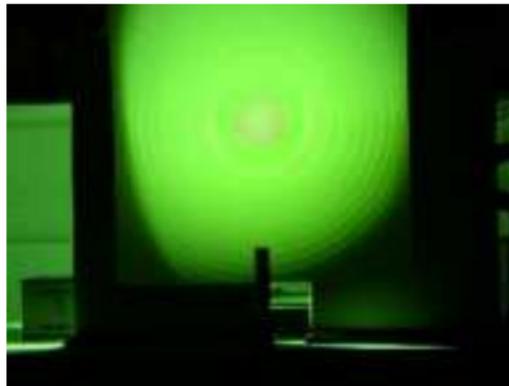
Superposition de 2  
ondes  
Conditions  
d'interférences  
Ordre d'interférences  
Contraste

## Cohérence

Cohérence spatiale  
Cohérence temporelle  
Brouillage  
Longueur de  
cohérence  
Conclusion

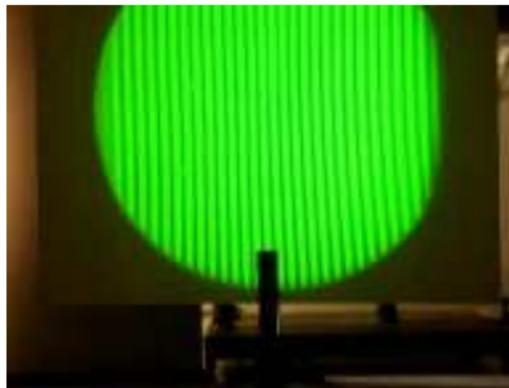
## Dispositif d'Young

# Source étendue



Le diaphragme est ouvert. Le contraste devient vite faible lorsqu'on élargit la source.

# Source monochromatique



Un filtre vert relativement sélectif crée un source quasi monochromatique. Le contraste est relativement élevé avec une source spectralement peu étendue.

## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

## Applications

## Généralités

Spectres  
Trains d'ondes

## Interférences

Superposition de 2  
ondes  
Conditions  
d'interférences  
Ordre d'interférences  
Contraste

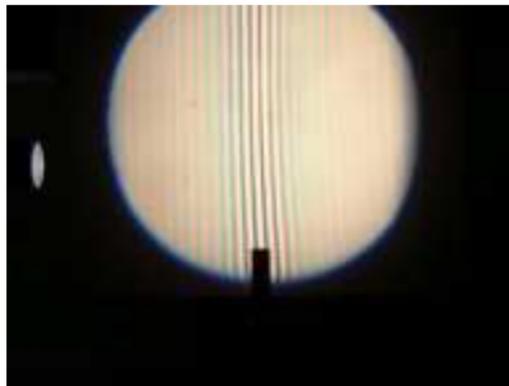
## Cohérence

Cohérence spatiale  
Cohérence temporelle

Brouillage  
Longueur de  
cohérence  
Conclusion

## Dispositif d'Young

# Source blanche



Le spectre de la source est large  $\lambda \in [400 \text{ nm} ; 750 \text{ nm}]$ . Le contraste devient vite faible sauf au centre de la figure qui correspond à une différence de marche faible ou nulle  $\delta \simeq 0$ .

## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

## Applications

## Généralités

Spectres  
Trains d'ondes

## Interférences

Superposition de 2  
ondes  
Conditions  
d'interférences  
Ordre d'interférences  
Contraste

## Cohérence

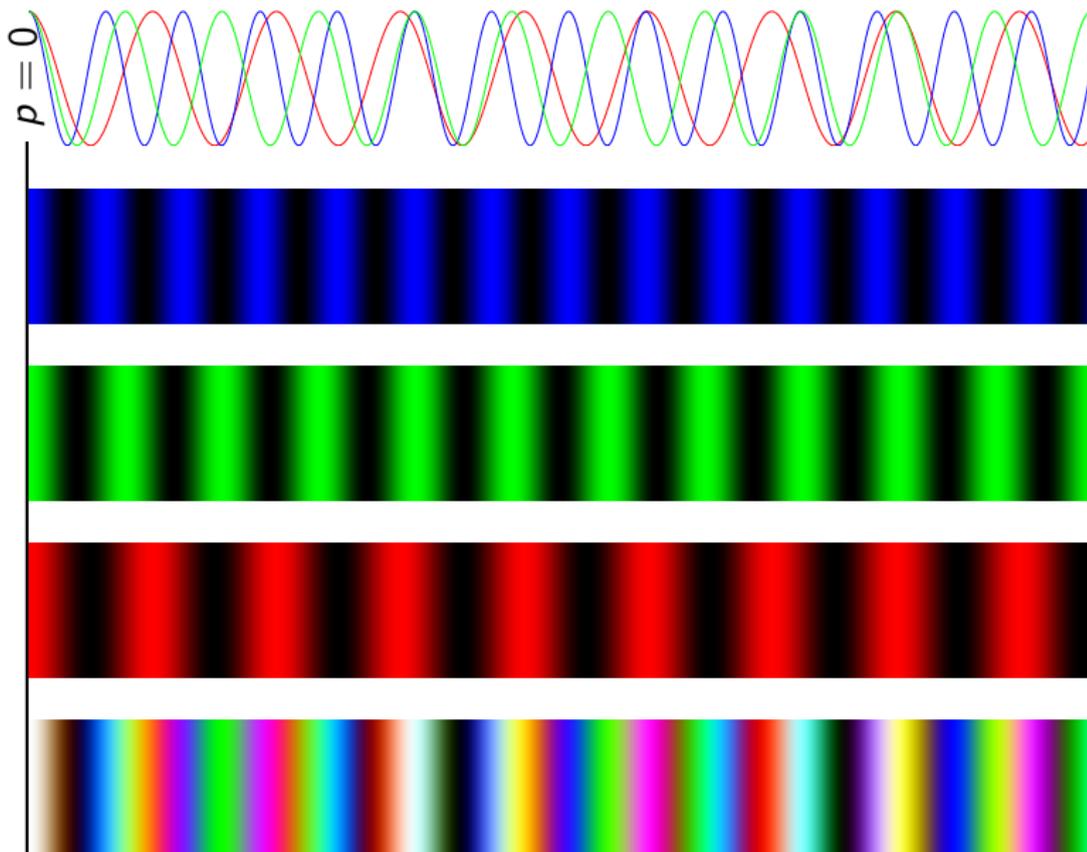
Cohérence spatiale  
Cohérence temporelle

## Brouillage

Longueur de  
cohérence  
Conclusion

## Dispositif d'Young

# Origine du brouillage



## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

## Applications

## Généralités

Spectres  
Trains d'ondes

## Interférences

Superposition de 2  
ondes  
Conditions  
d'interférences  
Ordre d'interférences  
Contraste

## Cohérence

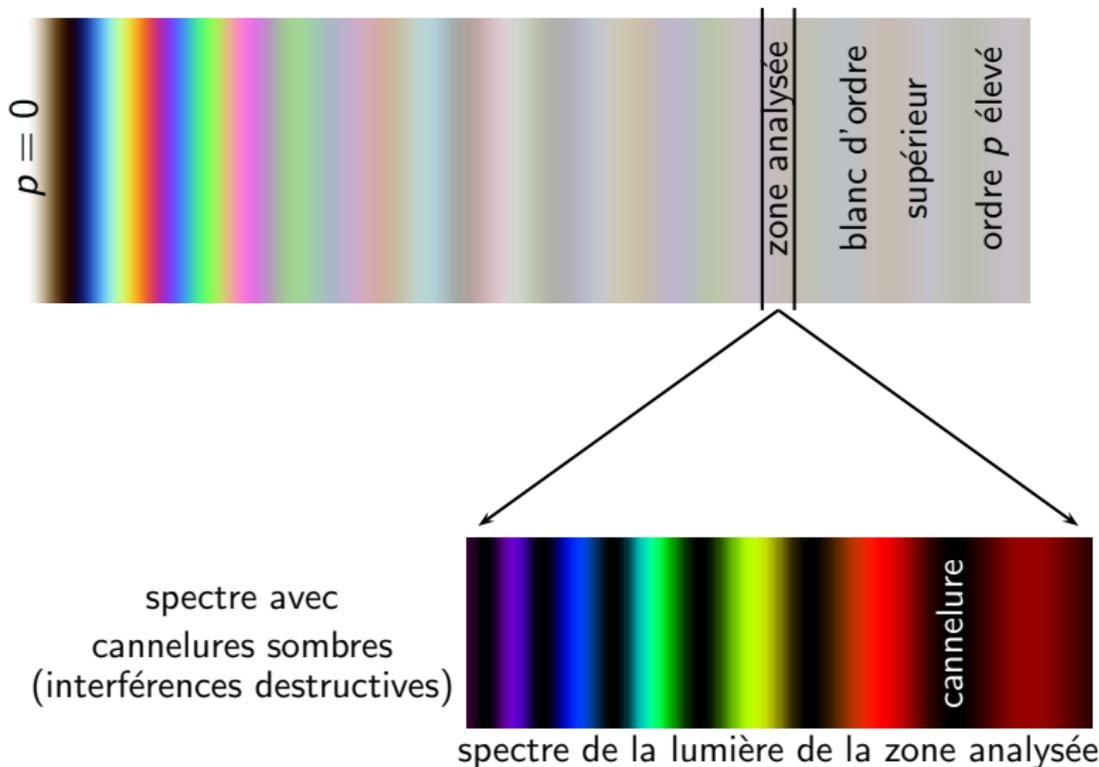
Cohérence spatiale  
Cohérence temporelle

## Brouillage

Longueur de  
cohérence  
Conclusion

## Dispositif d'Young

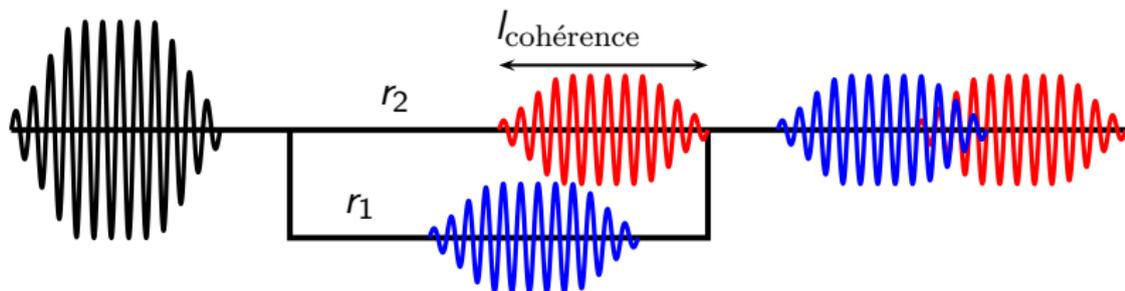
# Brouillage en lumière blanche



## Interférences

$l_{\text{cohérence}} = c\tau$  est la longueur moyenne des trains d'ondes.

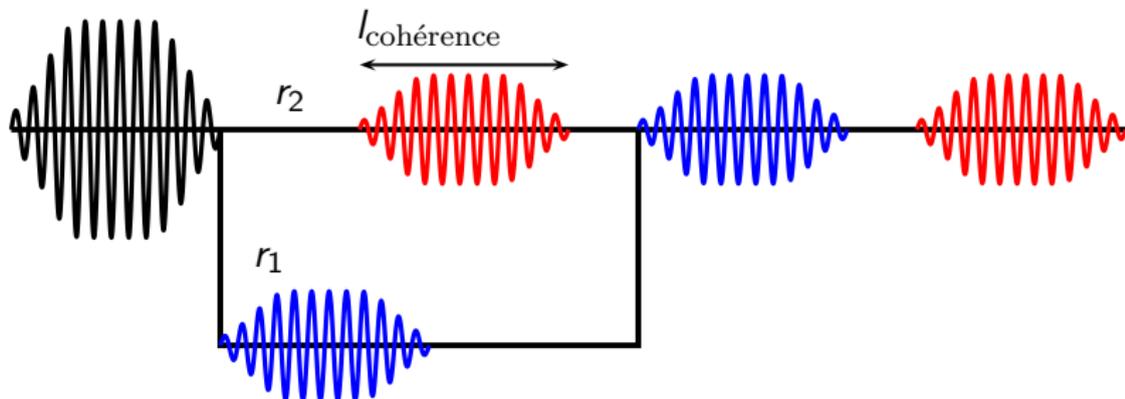
$$\delta = r_1 - r_2 < l_{\text{cohérence}}$$



Ici, les interférences se produisent car les deux parties du train d'ondes de départ se superposent.

## Pas d'interférences

$$\delta = r_1 - r_2 > l_{\text{cohérence}}$$



Ici, les interférences ne se produisent pas car les deux parties du train d'ondes de départ ne se superposent plus. La différence de marche est trop grande.

## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

## Applications

## Généralités

Spectres  
Trains d'ondes

## Interférences

Superposition de 2  
ondes  
Conditions  
d'interférences  
Ordre d'interférences  
Contraste

## Cohérence

Cohérence spatiale  
Cohérence temporelle  
Brouillage  
Longueur de  
cohérence  
Conclusion

## Dispositif d'Young

Cohérence non assurée, il ne peut pas y avoir d'interférences !

L'éclairement résultant sera la somme des éclairissements :

$$E = \sum_i E_i$$

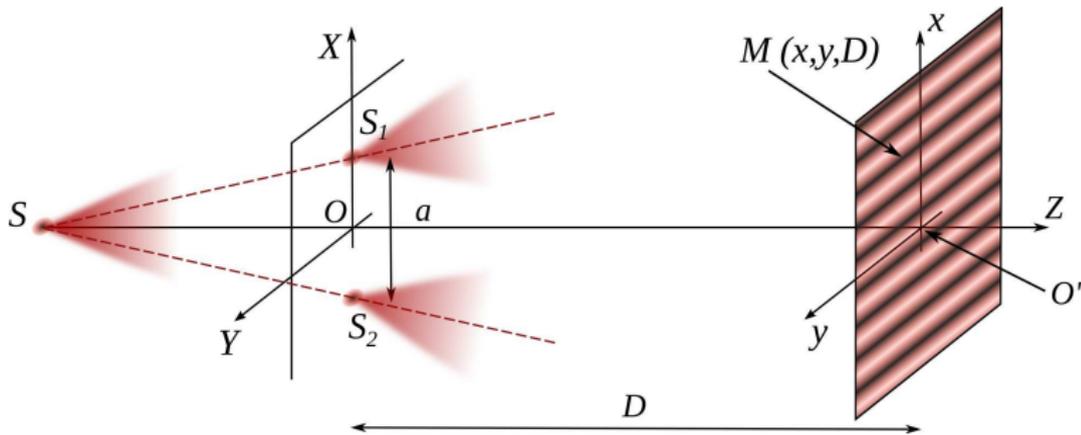
Cohérence assurée et  $\delta < l_{\text{cohérence}}$  :

L'éclairement résultant sera donné par :

$$E(M) = \frac{E_{\text{max}}}{2} \left( 1 + \cos 2\pi \frac{\delta}{\lambda} \right)$$

## Schéma de principe

C'est un dispositif par division du front d'onde. La situation théorique simple est constituée de deux trous dans un écran éclairés par une seule source. L'onde subit de la diffraction. En  $M$ , les deux ondes sont synchrones et cohérentes.



## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

## Applications

## Généralités

Spectres  
Trains d'ondes

## Interférences

Superposition de 2  
ondes  
Conditions  
d'interférences  
Ordre d'interférences  
Contraste

## Cohérence

Cohérence spatiale  
Cohérence temporelle  
Brouillage  
Longueur de  
cohérence  
Conclusion

## Dispositif d'Young

# Observation 1



## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

## Applications

## Généralités

Spectres  
Trains d'ondes

## Interférences

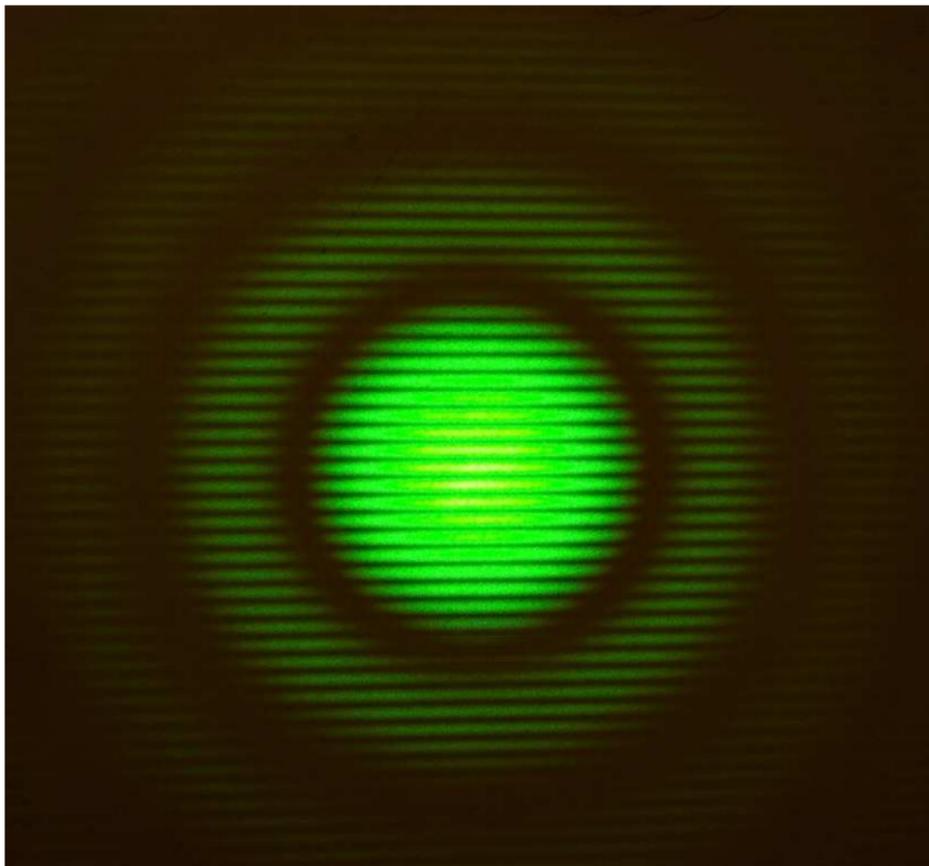
Superposition de 2  
ondes  
Conditions  
d'interférences  
Ordre d'interférences  
Contraste

## Cohérence

Cohérence spatiale  
Cohérence temporelle  
Brouillage  
Longueur de  
cohérence  
Conclusion

## Dispositif d'Young

# Observation 2



## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

## Applications

## Généralités

Spectres  
Trains d'ondes

## Interférences

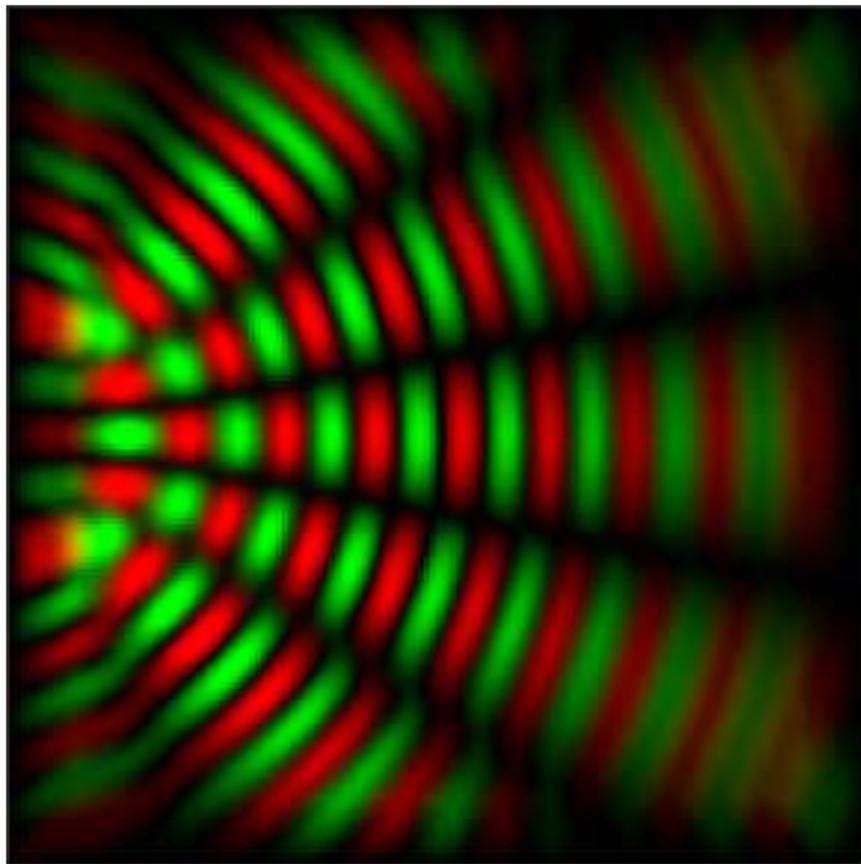
Superposition de 2  
ondes  
Conditions  
d'interférences  
Ordre d'interférences  
Contraste

## Cohérence

Cohérence spatiale  
Cohérence temporelle  
Brouillage  
Longueur de  
cohérence  
Conclusion

## Dispositif d'Young

# Simulation amplitude



## Interférences

JR Seigne  
MP\*,  
Clemenceau  
Nantes

## Applications

## Généralités

Spectres  
Trains d'ondes

## Interférences

Superposition de 2  
ondes  
Conditions  
d'interférences  
Ordre d'interférences  
Contraste

## Cohérence

Cohérence spatiale  
Cohérence temporelle  
Brouillage  
Longueur de  
cohérence  
Conclusion

## Dispositif d'Young

# Simulation intensité

